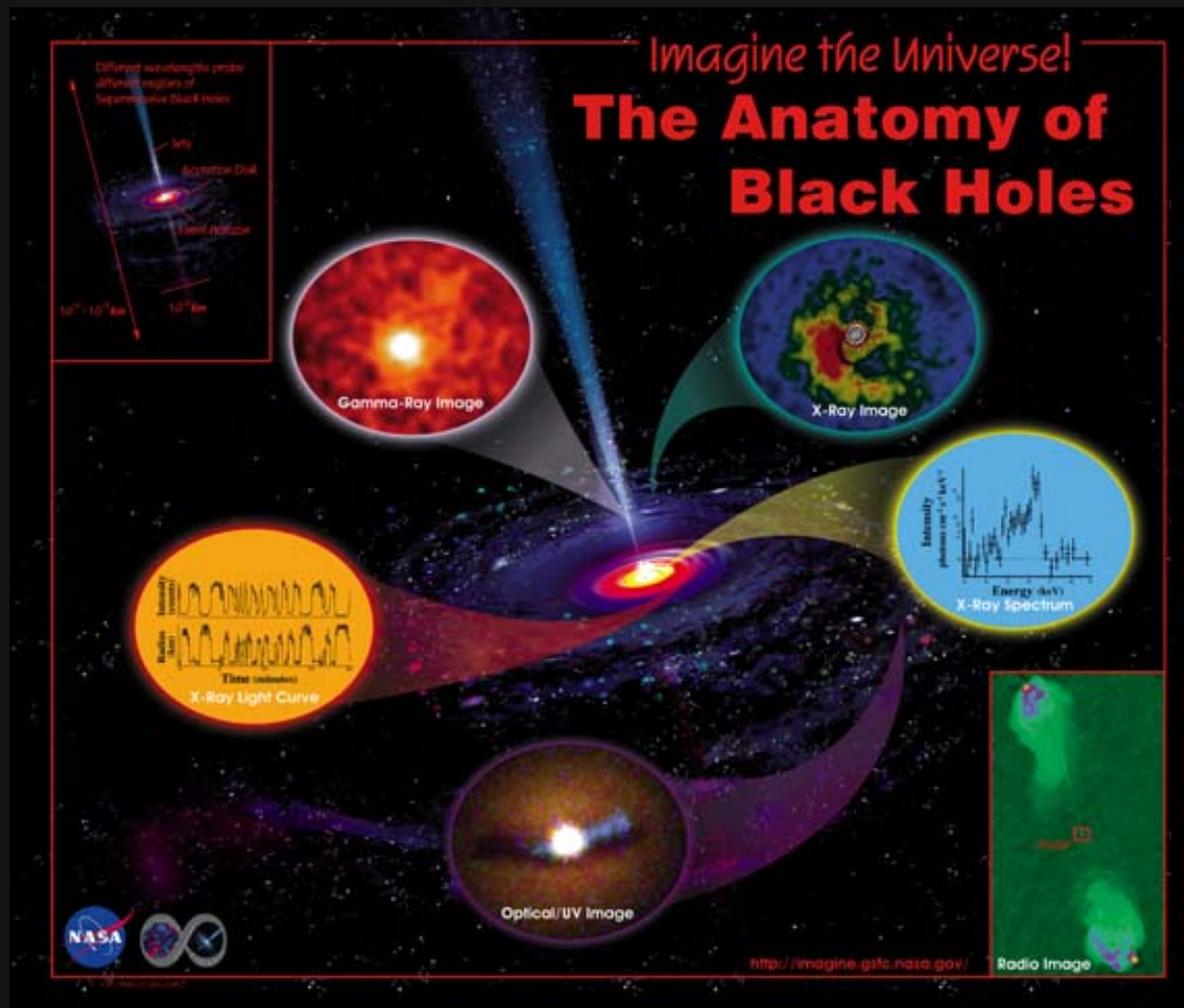


# Agujeros negros: una luz diferente

*Dr. Jim Lochner (NASA/GSFC), Chris Foster (UCSB)*



NSTA, 27 Marzo 2002

*Traducción: Javier Sánchez Quirós*

# Introducción

---

- ¿Por qué enseñar los agujeros negros?
- Si los agujeros negros son negros, ¿cómo podemos verlos?
- ¿Cómo sabemos que son agujeros negros?
  - Velocidad de dispersión Actividad
- ¿Existen algunos recursos disponibles en la Red?

# Conceptos para su enseñanza

---

- La velocidad de escape de la luz desde una estrella depende tanto de la masa de la estrella como de su radio.
- La gravedad es una fuerza básica de la naturaleza creada entre objetos que tienen masa.
- La velocidad de la luz, 300.000 Km./s, es la “velocidad límite” universal
- Las leyes del movimiento y de la gravitación se utilizan para estudiar los efectos de los agujeros negros sobre su entorno inmediato.

## ***Standards usados en su enseñanza***

---

(Tomado de: *Benchmarks for Science Literacy*, American Association for the Advancement of Science, Oxford University Press, 1993. )

Al finalizar el 12º Grado, los estudiantes deberían saber que:

Increasingly sophisticated technology is used to learn about the universe. Visual, radio, and x-ray telescopes collect information from across the entire spectrum of electromagnetic waves; computers handle an avalanche of data and increasingly complicated computations to interpret them; space probes send back data and materials from the remote parts of the solar system; and accelerators give subatomic particles energies that simulate conditions in the stars and in the early history of the universe before stars formed.

# *Movimiento y Fuerzas*

---

- La fuerza gravitacional es una atracción entre masas. El tamaño de esta fuerza es proporcional a las masas y aumenta rápidamente con el incremento de distancia entre ellas.

# ***Standards para los Grados 9-12:***

---

(Tomado de: *National Science Education Standards*, National Academy Press, 1998.)

- Movimientos y fuerzas
- Conservación de la energía y su incremento
- Interacciones entre la materia y la energía
- El origen y la evolución del Universo

---

Si los agujeros negros son negros,  
¿cómo podemos verlos?

# Lo que necesitas saber ...

---

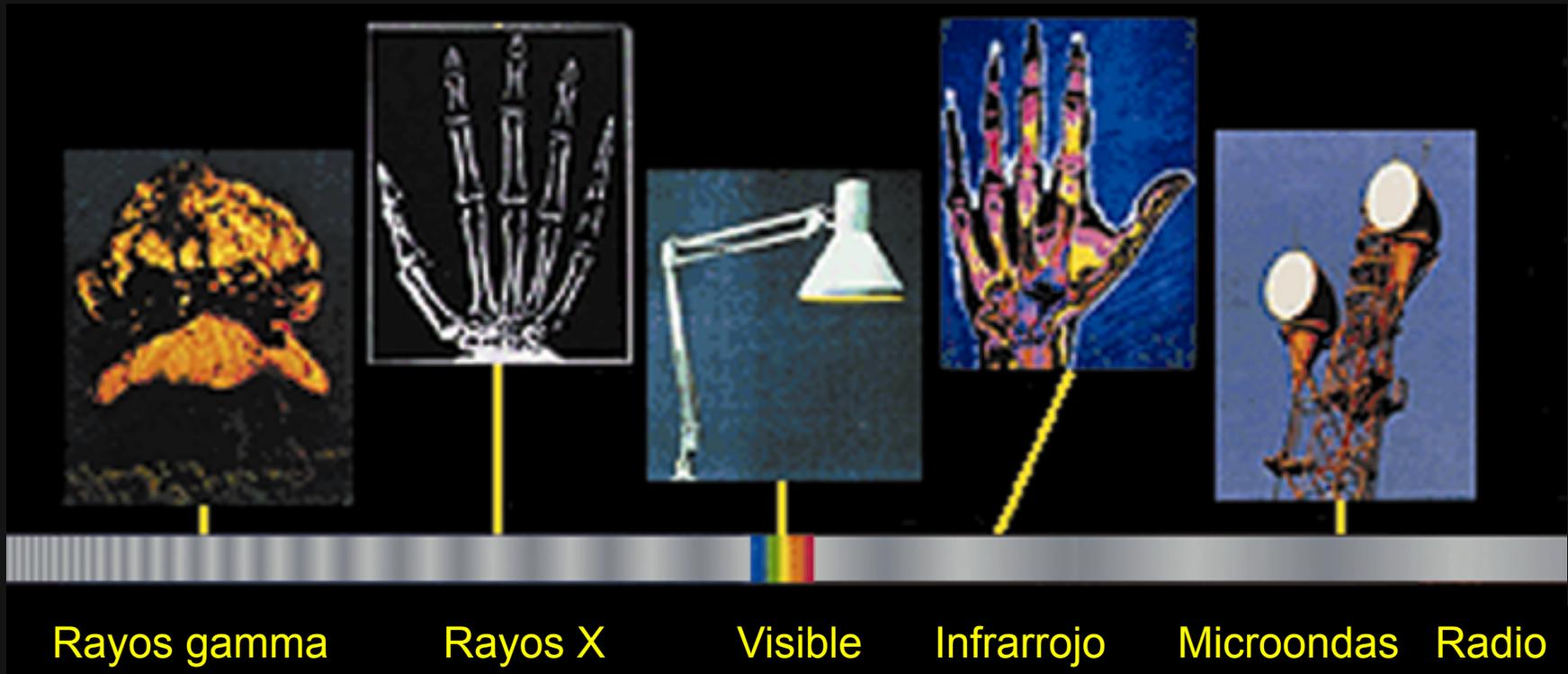
Existen agujeros negros de dos tamaños:

- “De masa estelar”
  - 5 - 20 veces la masa del Sol
  - Resultado de la explosión en forma de supernova de una estrella masiva
- Masivos (“Galaxias activas”)
  - Millones de veces la masa del Sol
  - Se encuentran en el centro de las galaxias

Lo que los convierte en 3 tamaños (más después...)

# Espectro EM

## Espectro electromagnético



# Óptico

---

Las imágenes ópticas observan regiones centrales de otras galaxias.



# Óptico

- Remolinos de materia alrededor de un agujero negro central.
- El gas próximo a un agujero negro hace que se caliente a temperaturas de ultravioleta y rayos X.
- Esto calienta el gas que lo rodea, por lo que se muestra rojo en el óptico.



**Circinus Galaxy**

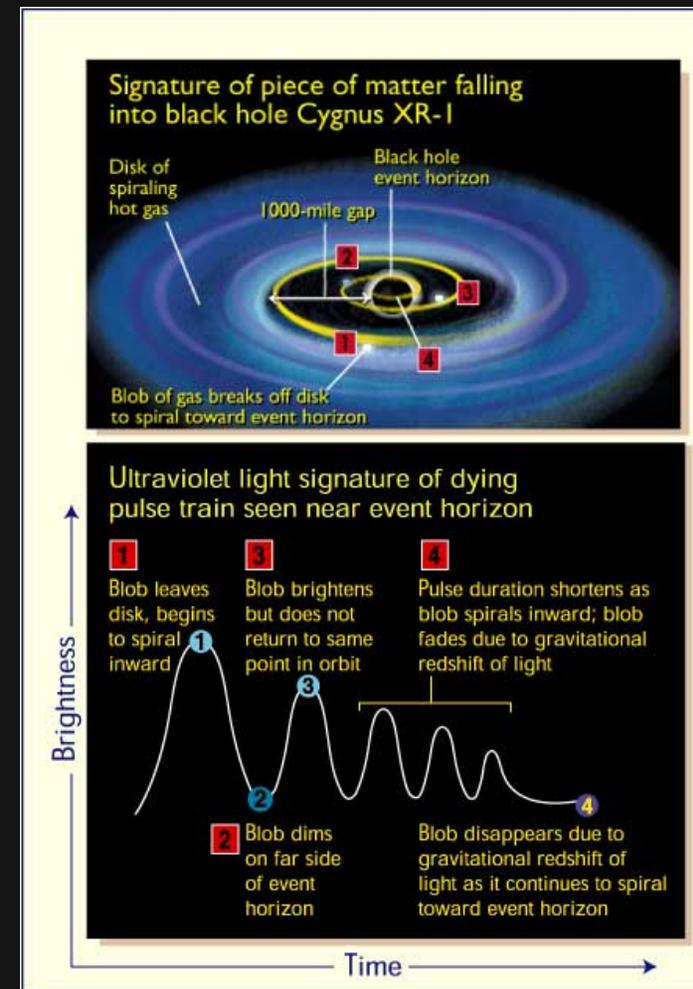
**Hubble Space Telescope • WFPC2**

NASA and A. Wilson (University of Maryland) • STScI-PRC00-37

# Ultravioleta

## Ver la materia que desaparece

- El Hubble ha observado los pulsos de luz ultravioleta emitidos por la materia cuando cae en el interior de un agujero negro.
- Estos pulsos surgen a partir de la materia que orbita alrededor de una fuente de gravedad intensa de un agujero negro.
- Los pulsos de luz, de una duración de 0,2 s., están desplazados hacia el rojo desde los rayos X hasta el ultravioleta, al caer en el interior de un agujero negro.



# Radio

---

Las ondas de radio nos informan acerca de los movimientos de las partículas en los campos magnéticos.

Usar muchas antenas de radio (o radiotelescopios) nos permite observar los detalles más pequeños



Una parte del Very Large Array, Socorro NM

# *Chorros de radio desde agujeros negros*

---

Muchos agujeros negros emiten chorros.

- La materia en los chorros se mueve a  $0,9c$ .
- Un chorro está compuesto probablemente de electrones y positrones.

Los campos magnéticos que rodean a un agujero negro expulsan materia y forman el chorro.

- La interacción de la materia del chorro con el campo magnético da lugar a la emisión de radio.

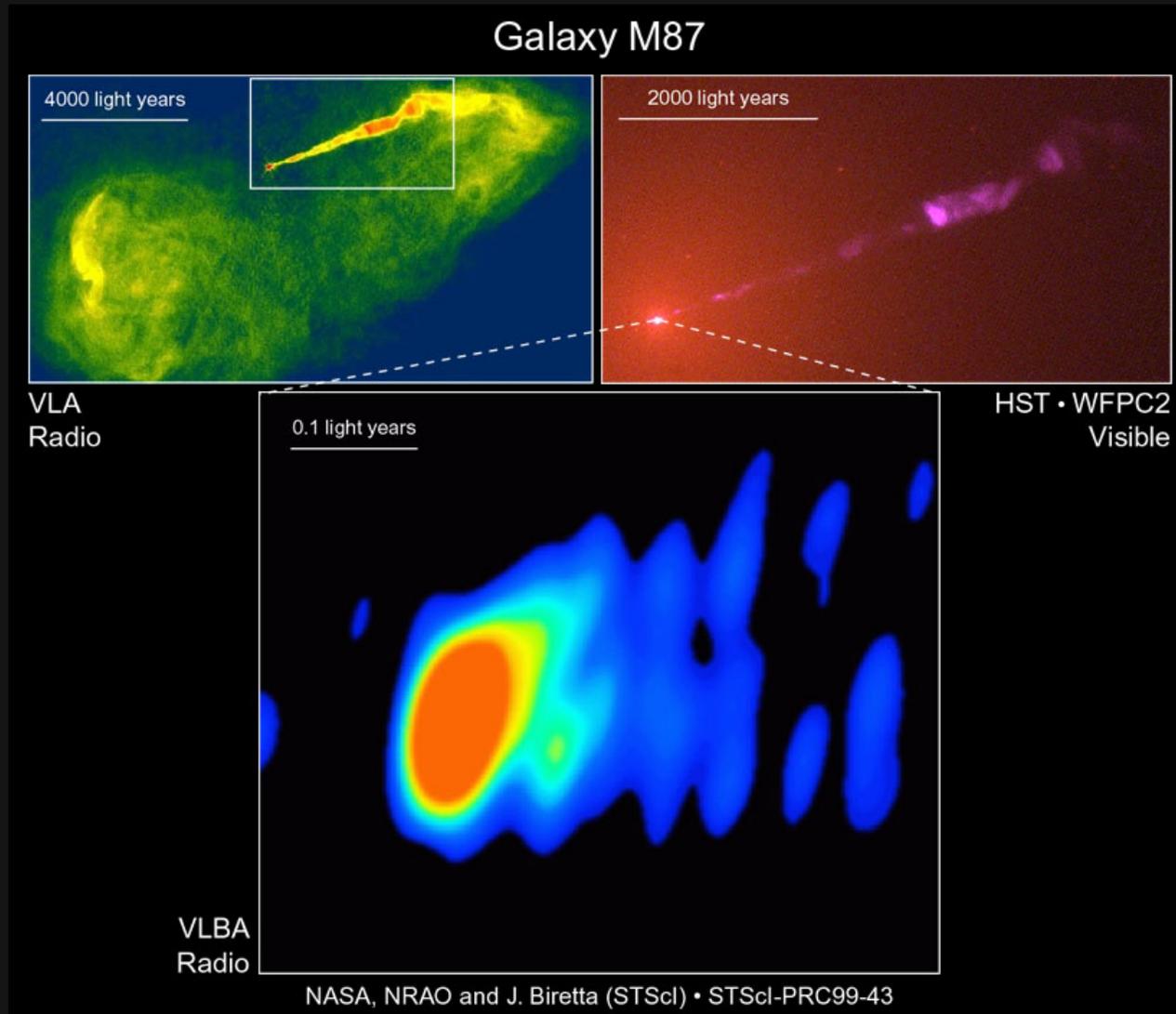
# *M87 – Una galaxia elíptica*



Con una curiosa característica

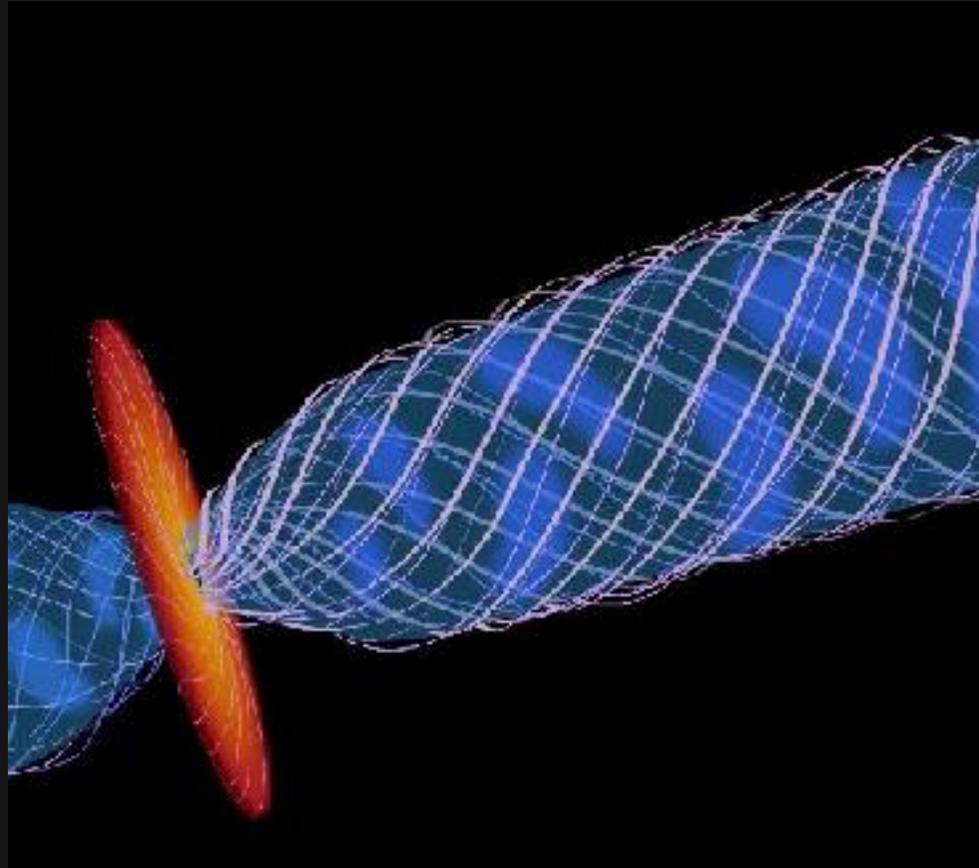


# *El radio muestra el origen del chorro*



# *Nuestra imagen muestra qué ocurre*

---



El campo magnético del disco que la rodea canaliza la materia en el interior del chorro

# Rayos X

---

Los rayos X revelan altas temperaturas y unos fenómenos altamente energéticos.

- Los datos de los satélites actuales se toman del observatorio de rayos X Chandra, del XMM y del Rossi X-ray Timing Explorer

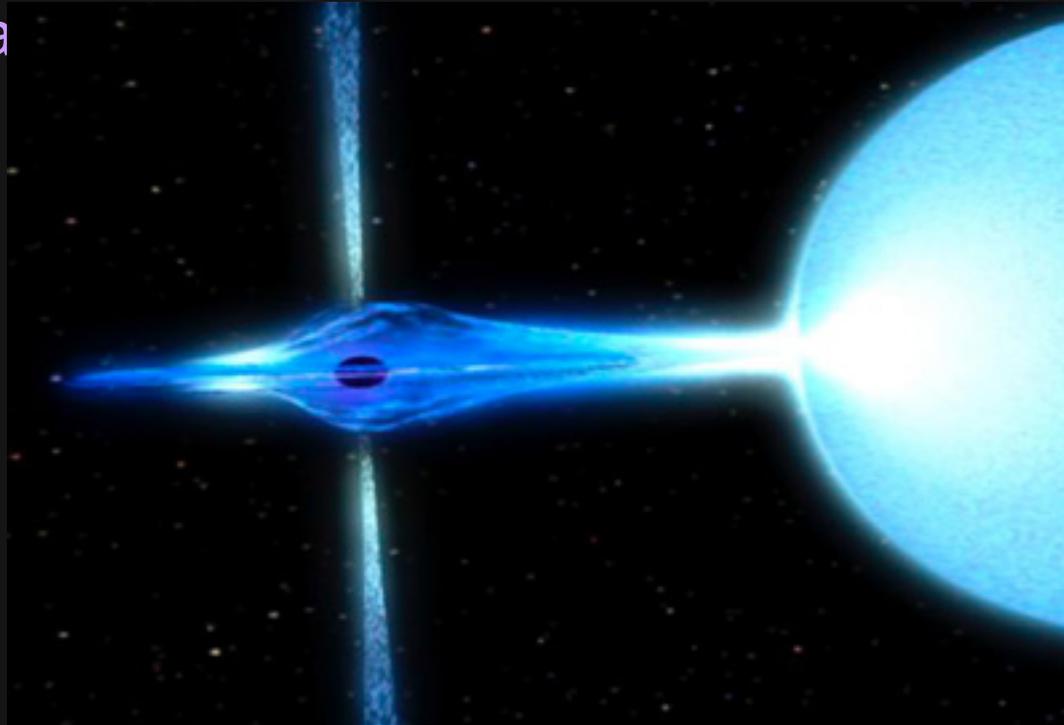


Observatorio de rayos X Chandra

# *Rayos X a partir de agujeros negros*

---

En los sistemas binarios cercanos, la materia fluye desde una estrella normal hacia un agujero negro. Los rayos X son emitidos desde el disco de gas caliente que se arremolina a



# *Poder de acreción*

---

La materia en el disco gana energía cuando cae en el interior del agujero negro.

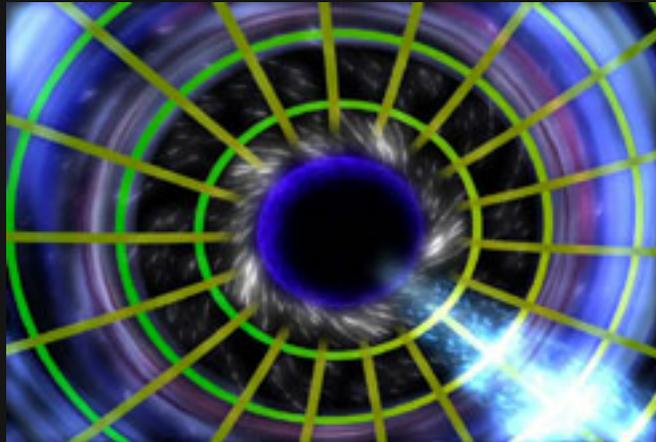
- La energía gravitacional se convierte en energía cinética.
  - La energía cinética se transforma en calor y rayos X.

Hasta el 42% de la masa de la materia que cae se convierte en energía.

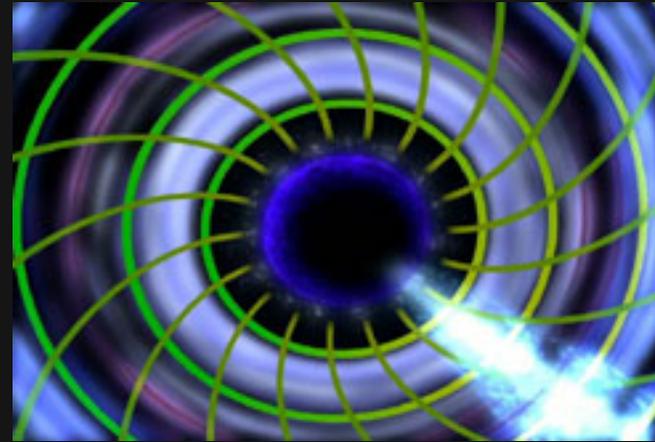
- Esto es, ¡ $10^{38}$  erg/s! (100.000 veces más que el Sol)

# Rayos X: Un agujero negro que gira

Esperamos que todo en el Universo gire. Sin embargo, los agujeros negros que no rotan son diferentes de los que sí lo hacen.



Agujero negro que no gira

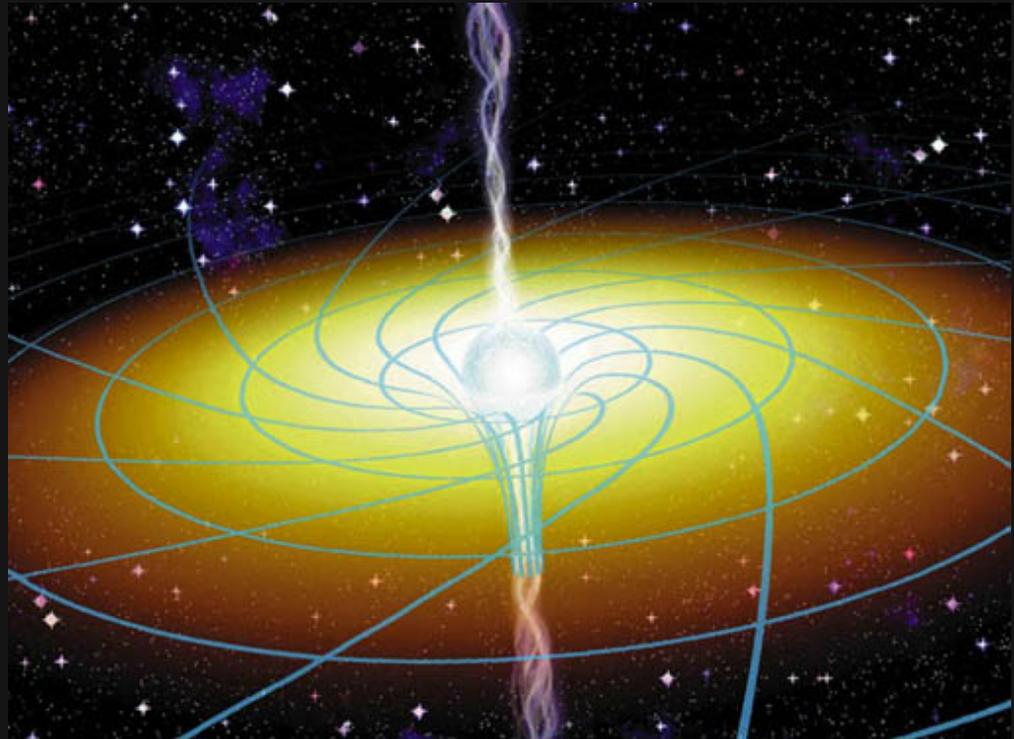


Agujero negro que gira

En GRO J1655-40, se descubrió un periodo de 2,2 ms. Esto implica una órbita que es demasiado pequeña para ser un agujero negro que no gira, lo que significa que el agujero negro está rotando

# Rayos X: Arrastre de imagen

- Detección de un periodo en GRO J1655-40 debido a la precesión del disco.
- Este periodo de precesión concuerda con lo esperado para el arrastre de imagen de espacio-tiempo alrededor de un agujero negro.



Créditos: J. Bergeron, Sky & Telescope Magazine

# Rayos X: Chorros

---



Imagen óptica de Cen A

Cen A es famosa por ser una galaxia peculiar con una fuerte emisión de radio.

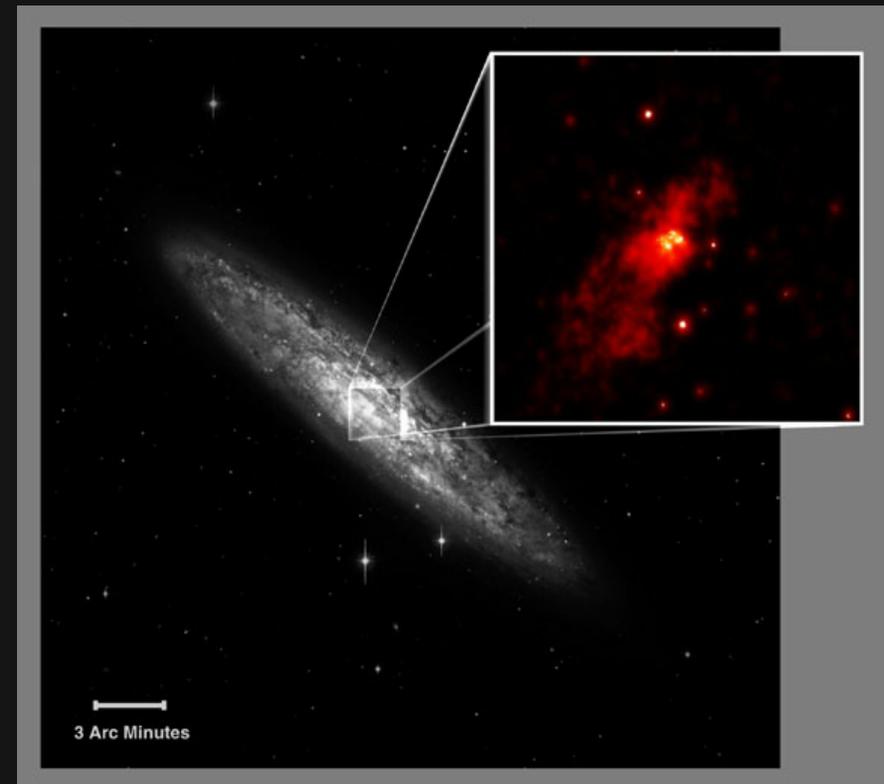
Pero también es un fuerte emisor de radio, y tiene un chorro de rayos X.



Imagen del Chandra de Cen A

# Rayos X: Masa media agujeros negros

- Se han encontrado agujeros negros con masas de unos cientos a unos miles de veces la masa del Sol fuera de las regiones centrales de un número de galaxias.
- A menudo en galaxias jóvenes.
- Podrían ser precursores de galaxias activas.



Imágenes óptica y en rayos X de NGC 253

# *Rayos gamma*

---

Los rayos gamma se han revelado como los fenómenos más energéticos del Universo

Los chorros en las galaxias activas emiten tanto rayos gamma como ondas de radio.



Observatorio de rayos gamma Compton

# Rayos gamma

---

## Galaxias activas

Seyferts – viendo el chorro desde el lateral

- Los rayos gamma son una extensión de la emisión termal vista en rayos X.

Blazars – mirando el chorro desde abajo

- La luminosidad de los rayos gamma es altamente variable
- Los rayos gamma surgen a partir de fotones de muy baja energía y van ganando energía a partir de los electrones que se mueven a altas velocidades en el chorro.

# Diferentes visiones del mismo fenómeno



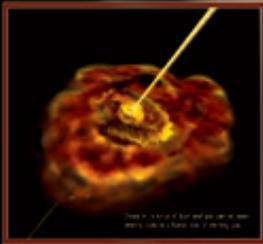
## ACTIVE GALAXIES



### Zooming In On The Galaxy



The long view of an active galaxy is dominated by the glow of light emanating from its bright nucleus. The glow of light surrounding the galaxy is much fainter.



There is a lot of dust and gas in the inner galaxy, which is heated up by the jet.



The nucleus is the brightest part of the galaxy. It is the source of the high-energy photons that we see. The jet is also very bright, but it is much fainter than the nucleus.

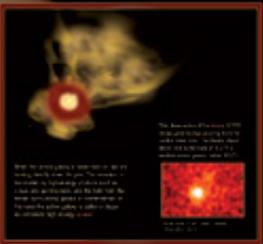
**What we see depends on the angle we see it.**

An active galaxy is one in which a tremendous amount of energy is emitted from the nucleus. Active galaxies take many forms, some have exquisitely bright nuclei pouring forth high-energy photons, others have high-energy nuclei but appear to be surrounded by a more-or-less "normal" galaxy, while others have long, narrow jets or beams of matter streaming out from the center. All these different flavors of galaxies may represent the same kind of object seen at different viewing angles. One such model is a generic model for the nucleus of an active galaxy, which contains a supermassive but invisible black hole - the engine that powers the phenomena we see.

© NASA/JPL-Caltech, ESA, and the European Space Agency

### Different Views Of The Galaxy

Viewing along the jet



**Blazar**

When the viewing angle is close to 0°, the jet is pointing directly at us. The nucleus is very bright, and the jet is also very bright. The jet is the source of the high-energy photons that we see.

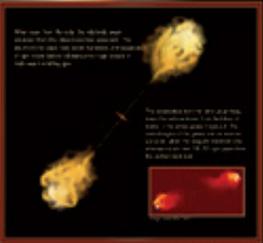
View 45° to jet



**Seyfert**

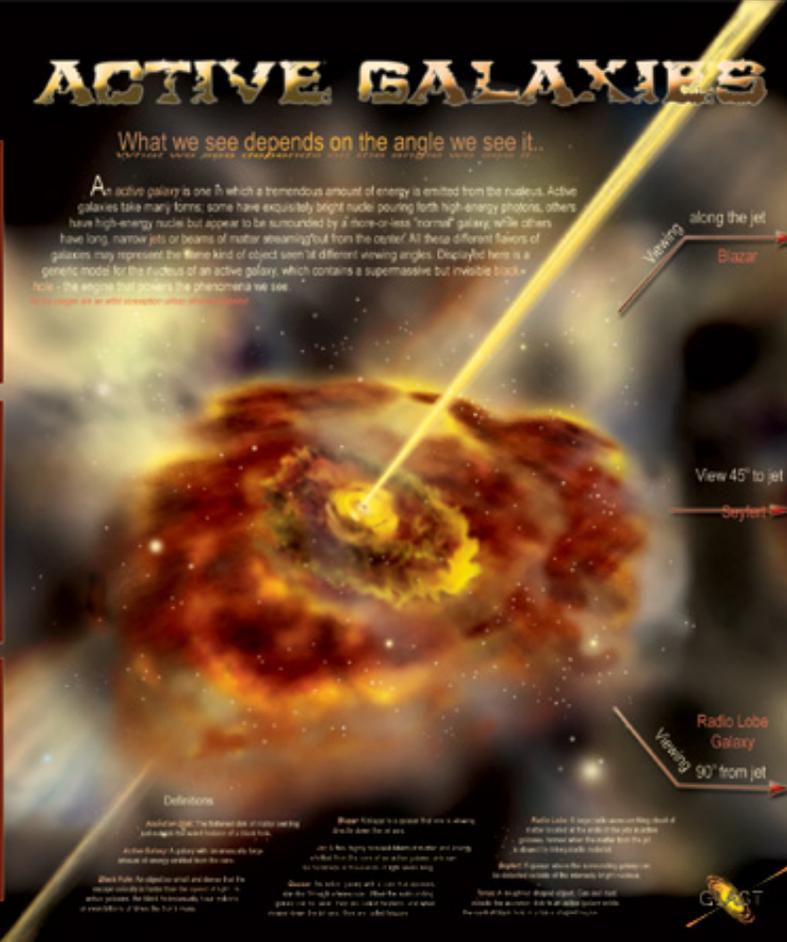
When the jet is at an angle to the line of sight, the jet is not as bright. The nucleus is still very bright, but the jet is much fainter. The jet is the source of the high-energy photons that we see.

Viewing 90° from jet



**Radio Lobe Galaxy**

When the jet is perpendicular to the line of sight, the jet is not visible. The nucleus is still very bright, but the jet is much fainter. The jet is the source of the high-energy photons that we see.



### Definitions

**Active Core:** The brightest part of a galaxy, containing the central black hole.

**Jet:** A long, narrow beam of matter and energy that is emitted from the nucleus of an active galaxy.

**Radio Lobe:** A region of space where the jet has deposited its energy, creating a large, diffuse cloud of gas and dust.

**Blazar:** A galaxy viewed at an angle close to 0° to the jet.

**Seyfert:** A galaxy viewed at an angle between 0° and 90° to the jet.

**Radio Lobe Galaxy:** A galaxy viewed at an angle close to 90° to the jet.

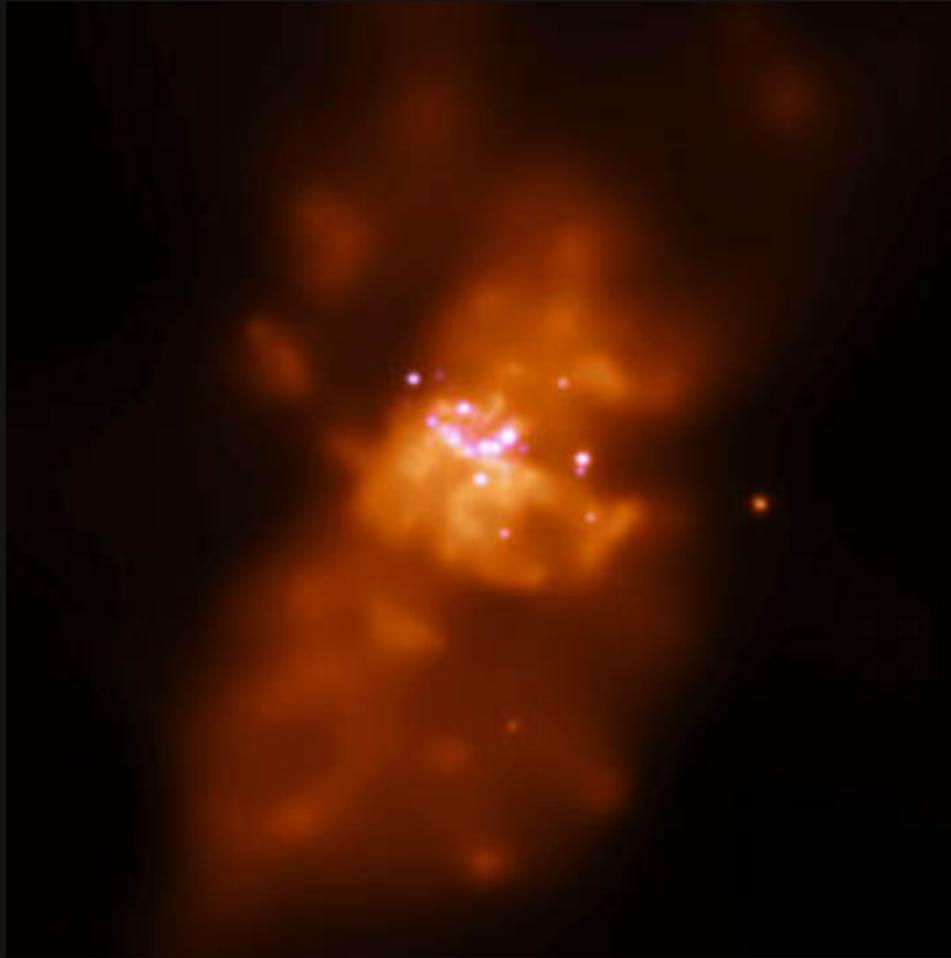
**Blazar:** A galaxy viewed at an angle close to 0° to the jet.

**Seyfert:** A galaxy viewed at an angle between 0° and 90° to the jet.

**Radio Lobe Galaxy:** A galaxy viewed at an angle close to 90° to the jet.

# ¿Cómo reconocemos un agujero negro?

---



Masa media de los agujeros negros

# Sistemas de estrellas binarias

- Los agujeros negros son a menudo parte de un sistema de estrellas binarias, en los que dos estrellas giran una en torno a la otra.
- Lo que vemos desde la Tierra es una estrella visible que orbita alrededor de lo que parece ser la nada.
- Podemos deducir la masa del agujero negro por la órbita de la estrella visible que gira en torno a él.
- Cuanto mayor es un agujero negro, mayor es el empuje gravitacional y mayor el efecto sobre la estrella visible.

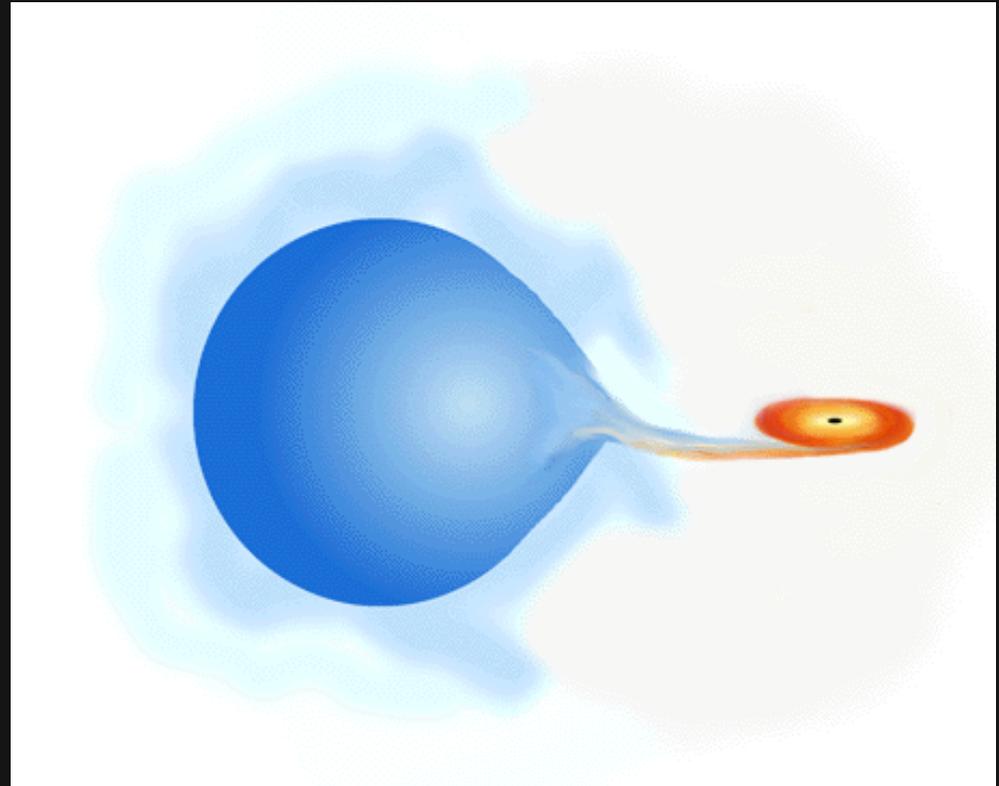


Ilustración del Chandra

# Produce rayos X

- Los agujeros negros capturan el material estelar cercano.
- Como el gas se mantiene cerca del agujero negro, lo calienta.
- El gas se calienta hasta temperaturas de millones de grados.
- El gas calentado a estas temperaturas deja escapar tremendas cantidades de energía en forma de rayos X.

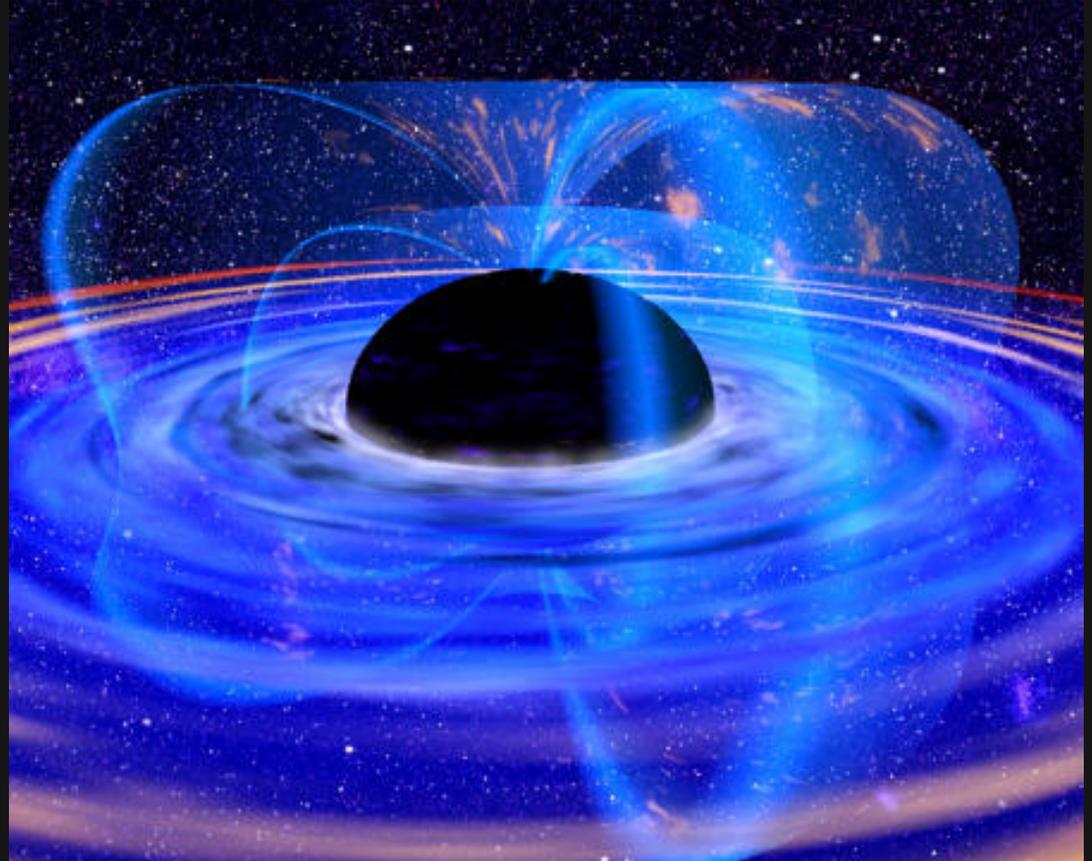
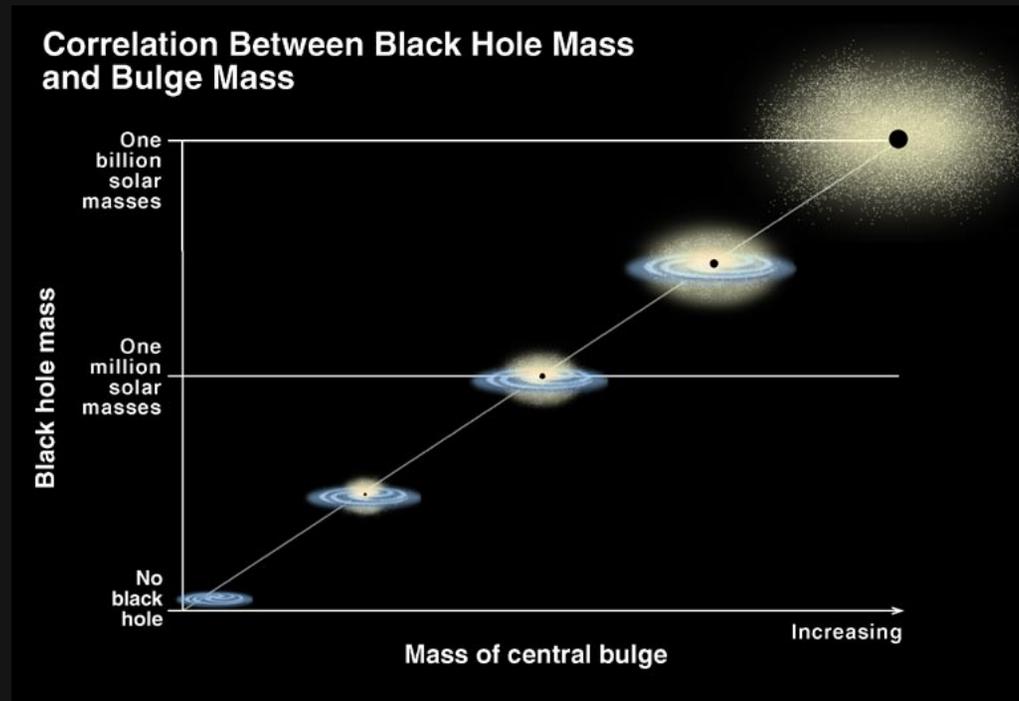


Imagen del XMM-Newton

# Velocidad del gas y de las estrellas

- El telescopio espacial Hubble puede medir con precisión la velocidad del gas y de las estrellas que se encuentran alrededor de un agujero negro.
- Se ha descubierto una correlación entre la masa de un agujero negro y el aumento de velocidad de las estrellas en el bulbo central de una galaxia.
- Cuanto más rápidamente se muevan las estrellas, mayor será el agujero negro.



Tomado de STScI

---

**Hay una evidencia creciente que sugiere que los agujeros negros supermasivos se asientan en el corazón de muchas galaxias, si no la mayoría, ...**



***... e incluso en el centro de nuestra Vía Láctea***

---

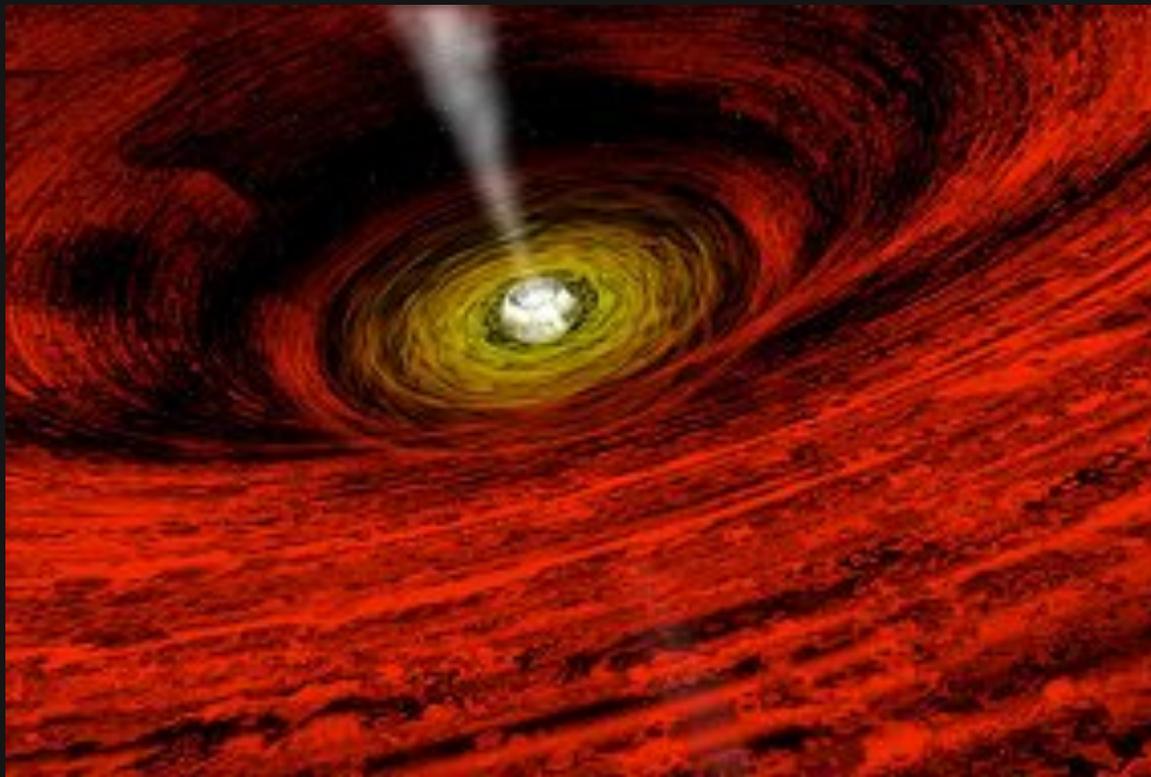
Hoy sabemos que el núcleo de nuestra Vía Láctea parece ser un extraño lugar, donde las estrellas están tan cerca unas de otras que, si nuestro Sistema Solar estuviese situado allí, habría estrellas incluso *entre* los planetas.

Sólo a medio año-luz del centro de la galaxia, las estrellas se mueven rápidamente a una velocidad de cientos de kilómetros por segundo. En el parsec central de su núcleo, encontramos estrellas calientes, masivas, que se formaron hace sólo unos pocos millones de años.

---

Las estrellas cercanas al centro tienen unas velocidades y direcciones de sus movimientos orbitales muy diferentes, lo que se denomina “velocidad de dispersión”.

Parece que la causa de este comportamiento caótico no es otra que un agujero negro supermasivo (SMBH), que se asienta en el centro galáctico.



# **Actividad**

---

***Hallar la masa del agujero negro en el interior de la galaxia a partir de la dispersión de las velocidades estelares cercanas al centro galáctico***



Imagen de M81 en ultravioleta tomada por el telescopio XMM-Newton

# Actividad

---

Realizar una gráfica que muestre el logaritmo de la masa del agujero negro supermasivo (SMBH) en el eje y y la velocidad de dispersión en el eje x. Señala cada tres puntos o más si eres rápido y luego intenta dibujar la curva que a simple vista mejor se ajuste a los datos.

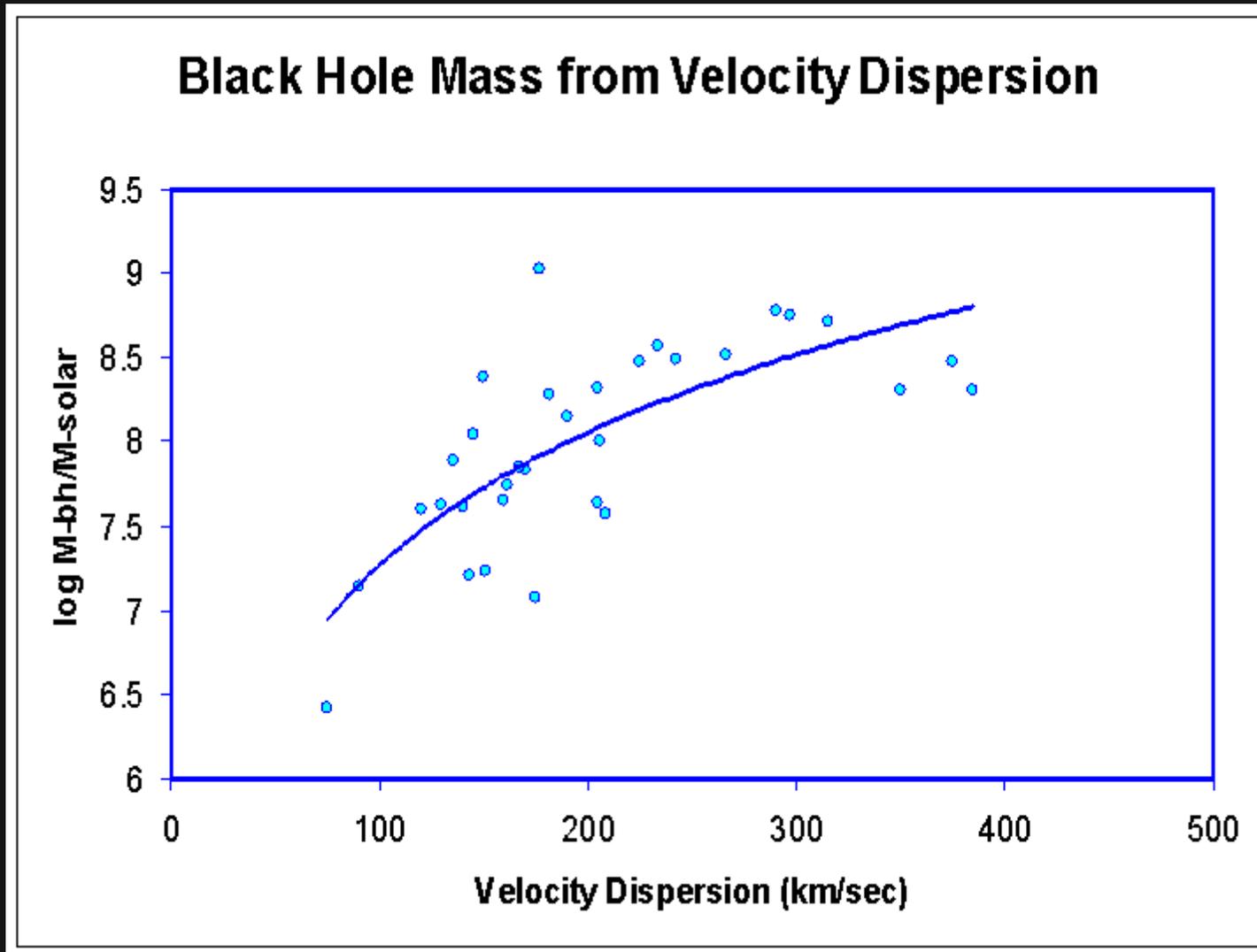
La masa del agujero negro supermasivo central se midió independientemente y se ofrece en unidades de millones de veces la masa solar. La velocidad de dispersión aparece en unidades de millones de kilómetros/segundo.

Estos datos han sido tomados de una conferencia pronunciada por Karl Gebhardt en el Institute for Theoretical Physics de UCSB en Febrero de 2002.

# Masa del SMBH central y velocidad de dispersión de las galaxias mejor estudiadas

Galaxy	SMBH Mass units: 10 <sup>6</sup> solar masses	Log SMGH Mass	Velocity dispersion units: km/sec
M31	450	8.7	160
M32	2.6	6.4	75
NGC 821	37	7.6	209
NGC 1023	44	7.6	205
NGC 1068	17	7.2	151
NGC 2787	41	7.6	140
NGC 3377	110	8.0	145
NGC 3031	68	7.8	170
NGC 3245	210	8.3	205
NGC 3379	100	8.0	206
NGC 3384	16	7.2	143
NGC 3998	560	8.7	297
NGC 3608	190	8.3	182
NGC 4253	42	7.6	130
NGC 4261	520	8.7	315
NGC 4291	310	8.5	242
NGC 4342	300	8.5	225
NGC 4459	70	7.8	167
NGC 4473	140	8.1	190
NGC 4486	300	8.5	375
NGC 4564	56	7.7	162
NGC 4596	78	7.9	136
NGC 4549	200	8.3	385
NGC 4697	17	7.2	177
NGC 4742	14	7.1	90
NGC 5128	240	8.4	150
NGC 5845	370	8.6	234
NGC 6251	600	8.8	290
NGC 7052	330	8.5	266
NGC 1459	2600	9.4	350

# Resultado de la gráfica



# Preguntas

---

Describe la relación encontrada entre la masa del SMBH y la velocidad de dispersión de las estrellas en la región central de cada galaxia.

- La galaxia M87 es una galaxia gigante elíptica y es la primera galaxia fuera de nuestro sistema donde se encontró un agujero negro. En 1996 los científicos de la NASA en el Goddard Spaceflight Center midieron las velocidades de las estrellas en la región central de M87 y determinaron, a partir de los efectos gravitacionales, que debía existir un agujero negro en su interior.

Dado que la velocidad de dispersión es de 375 Km./s, a partir de tu gráfica, ¿qué valores son posibles para el SMBH en el centro de M87?

La Vía Láctea tiene una velocidad de dispersión de 108 Km./s. A partir de tu gráfica, ¿qué rango de masas es posible para nuestro SMBH central?

# *Recursos en Internet, página 1*

---

Imagine the Universe – “An Introduction to Black Holes”

[http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/known\\_1/black\\_holes.html](http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/known_1/black_holes.html)

Amazing Space – “The Truth About Black Holes”

<http://amazing-space.stsci.edu/>

Hubble Space Telescope Institute

[http://hubble.stsci.edu/news\\_and\\_views/cat.cgi.black\\_holes](http://hubble.stsci.edu/news_and_views/cat.cgi.black_holes)

Adler Planetarium - “Astronomy Connections - Gravity and Black Holes”

<http://www.adlerplanetarium.org/education/ac/gravity/index.html>

Gravity Probe B <http://einstein.stanford.edu/>

# *Recursos en Internet, página 2*

---

## Constellation X-ray Observatory

[http://constellation.gsfc.nasa.gov/ga/black\\_holes.html#what](http://constellation.gsfc.nasa.gov/ga/black_holes.html#what)

## Imagine the Universe: “You be the Astrophysicist” - Determine the Mass of Cygnus X-1

<http://imagine.gsfc.nasa.gov/YBA/cyg-X1-mass/intro.html>

## Imagine the Universe – “Taking a Black Hole for a Spin”

[http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/features/movies/spinning\\_blackhole.html](http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/features/movies/spinning_blackhole.html)

## Starchild – “Black Holes”

[http://starchild.gsfc.nasa.gov/docs/StarChild/universe\\_level2/black\\_holes.html](http://starchild.gsfc.nasa.gov/docs/StarChild/universe_level2/black_holes.html)

## “Virtual Trips to Black Holes and Neutron Stars”

[http://antwrp.gsfc.nasa.gov/htmltest/rjn\\_bht.html](http://antwrp.gsfc.nasa.gov/htmltest/rjn_bht.html)

# Recursos en Internet, página 3

---

Universe! – “Voyage to a Black Hole”

<http://cfa-www.harvard.edu/seuforum/explore/blackhole/blackhole.htm>

Falling Into a Black Hole

<http://casa.colorado.edu/~ajsh/schw.shtml>

Massive Black Hole Information Center

<http://arise.jpl.nasa.gov/arise/infocenter/info-center.html>

Everything you need to know about Black Holes

<http://www.astro.keele.ac.uk/workx/blackholes/index3.html>

Agujeros negros: Una luz diferente (esta presentación)

<http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/teachers/blackholes/blackholes.html>